

Dawid SOBEL, Karol JEDRASIAK, Damian BERESKA, Krzysztof DANIEC,
Aleksander NAWRAT
Politechnika Śląska

MULTIMEDIALNY SYSTEM DETEKCJI TRAFIENÍ

Streszczenie. W artykule przedstawiono opracowane elementy multimedialnego trenera strzeleckiego umożliwiającego trening w wirtualnej rzeczywistości z wykorzystaniem broni palnej. System działa w oparciu o kilka współpracujących ze sobą modułów, w skład których wchodzi algorytm kalibracji fotometrycznej, algorytm detekcji miejsca trafienia pocisku wystrzelonego z broni palnej oraz algorytm śledzenia plamki lasera w widmie podczerwieni.

MULTIMEDIA HIT DETECTION SYSTEM

Summary. The article presents the developed elements of the multimedia shooting detection system that allows training in virtual reality with using of real firearms. The system operates on the basis of several modules cooperating with each other, which include the photometric calibration algorithm, the algorithm for detection of the hit point of a bullet fired from a firearm and the algorithm for tracing the laser spot in the infrared spectrum.

1. Wstęp

Obserwujemy intensywny rozwój systemów symulacyjnych, które umożliwiają obniżenie kosztów przeprowadzania szkolenia, praktycznie nieograniczony wybór scenariuszy treningowych czy zapewnienie bezpieczeństwa użytkowników, nie narażając ich zdrowia i życia. Trenerzy stosowane są podczas treningu astronautów, pilotów, operatorów i kierowców pojazdów naziemnych. Zanurzenie użytkowników w rzeczywistości wirtualnej umożliwia wyrobienie prawidłowych nawyków a koszty błędów są minimalizowane. Użytkownicy mogą przygotowywać się ćwicząc na trudnych scenariuszach, które byłyby niemożliwe do wdrożenia podczas prawdziwego treningu. Niestety trening w wirtualnej rzeczywistości nie oddaje w pełni warunków rzeczywistych i wymusza zastosowanie modeli pewnych zjawisk fizycznych, które odzwierciedlają zjawiska rzeczywiste, ale tylko w sposób przybliżony. Te niedokładności mogą skutkować wypracowaniem błędnych nawyków i niepoprawnym treningiem pamięci mięśniowej, co utrudni wykonywanie rzeczywistych czynności operacyjnych.

W tym artykule przedstawiamy opracowane elementy multimedialnego trenera strzeleckiego umożliwiającego trening w wirtualnej rzeczywistości z wykorzystaniem broni palnej. Opracowany algorytm opiera się na kilku elementach, w skład których wchodzi algorytm kalibracji fotometrycznej, algorytm detekcji miejsca trafienia pocisku

wystrzelonego z broni palnej oraz algorytm śledzenia plamki lasera w widmie IR.

2. Przegląd istniejących rozwiązań

Klasyczny trening strzelecki przeprowadzany jest wewnątrz budynku strzelnicy lub na poligonie. Celami są metalowe bądź papierowe tarcze, do których oddaje się strzały z wykorzystaniem broni palnej. Ponieważ szkolenie tego typu może prowadzić do utraty zdrowia, dlatego prowadzone jest tylko w obszarach objętych szczególnym nadzorem, zapewniającym bezpieczeństwo oddawania strzałów. Powoduje to ograniczony dostęp i wyższy koszt obsługi obiektu. Tarcze strzelnicze są zazwyczaj prostymi obrazami drukowanymi na kartach papieru, dlatego trudno jest przeprowadzić realistyczny trening taktyczny z wykorzystaniem prawdziwej broni strzeleckiej.

Rozwiązaniem, które umożliwia zwiększenie realizmu celów i scenariuszy jest zastosowanie wirtualnej rzeczywistości. Na rynku są obecnie rozwiązania, które wykorzystują jej możliwości, ale charakteryzują się zazwyczaj zamkniętą konstrukcją, która uniemożliwia ich rozwój i powszechne użytkowanie. Ze względu na długi cykl rozwoju takich systemów są one rzadko uaktualniane i korzystają z przestarzałego sprzętu. Systemy wykorzystujące technologie wirtualną działają zazwyczaj w oparciu o wykrywanie strzałów z replik laserowych i interakcję z wirtualną rzeczywistością. Takie rozwiązanie nie pozwala jednak na wypracowanie prawidłowej pamięci mięśniowej. Rozwiązaniem lepszym jest wykrywanie strzałów z broni palnej, przy jednoczesnym śledzeniu znacznika lasera broni, dzięki czemu uzyskuje się wysoki poziom realizmu symulacji.

Na postawie przeglądu istniejących rozwiązań istnieją dwa główne systemy opierające swoje działanie na wykrywaniu trafienia z broni palnej. Pierwszym z nich jest system DPCS [5], który działa w oparciu o układ kamer oraz oświetlenia służący wykrywaniu dziur po pociskach kierowanych w stronę ekranu. Na ekranie wyświetlana jest wizualizacja z wykorzystaniem wideoprojektorowego systemu projekcji obrazu, przedstawiająca wirtualną scenę z celami. Brak implementacji algorytmu kalibracji fotometrycznej zmusza producenta do stosowania projektorów o niższych parametrach prezentacji obrazu co obniża realizm symulacji. System wymaga specjalnej konstrukcji ekranu i uniemożliwia wyświetlanie obrazu bezpośrednio na tłumiku rykoszetów, co znacznie komplikuje strukturę i zwiększa koszty rozwiązania, a także implikuje trudności w jego powszechnym użytkowaniu.

Drugim rozwiązaniem jest system LaserShot [4], wykorzystywany powszechnie w siłach zbrojnych. Składa się z kamery termowizyjnej oraz ekranu, wykonanego ze specjalnego materiału i skalibrowanym z nim projektorem. Wykrywanie trafień w płaszczyźnie ekranu odbywa się za pomocą komputerowej analizy strumienia wideo z kamery termowizyjnej. Wykorzystanie specjalnego ekranu, o znanych właściwościach pozwala na progowanie poziomu ciepła emitowanego przez ekran i wykrywanie miejsca trafienia. Po trafieniu pocisku w ekran wzrasta temperatura małego obszaru ekranu co identyfikowane jest jako strzał. LaserShot udostępnia rozwiązanie wyświetlające wizualizacje za pomocą systemu wieloprojektorowego jednak nie daje możliwości łączenia pojedynczych projekcji w jedną spójną wizualizację.

3. Architektura systemu

Opierając się na analizie istniejących rozwiązań scharakteryzowano wyzwania i wymagania tworzonego systemu. Pierwszym z nich była możliwość wykrywania punktu trafienia bezpośrednio na ekranie, zbudowanym z tłumików rykoszetów. Takie rozwiązanie nie wymaga stosowania specjalnych ekranów oraz pozwala na wyświetlanie wizualizacji oraz wykrywania strzałów w tym samym układzie odniesienia. Ponieważ obraz miał być wyświetlany bezpośrednio na tłumiku rykoszetów zachodziła potrzeba zastosowania drugiego elementu, czyli algorytmu kalibracji geometrycznej i fotometrycznej wieloprojektorowego systemu projekcji obrazu, zapewniających spójność wizualizacji na całej jej przestrzeni pod względem geometrycznym i barwnym [9, 12]. System musiał być odporny na zmiany zachodzące w kształcie tłumików rykoszetów deformujących się podczas strzelań. Ostatnim wymaganiem była możliwość śledzenia punktu celowania w celu prowadzenia statystyk i oceny jakości strzelania na podstawie końcowego raportu.

Opracowany system składa się z następujących komponentów: moduł projekcyjny składający się z dwóch projektorów, komputer przetwarzający strumienie wideo z kamery termowizyjnej oraz kamery IR, komputer generujący rzeczywistość wirtualną, moduł zawierający wielomodalny system kamery FIR, IR oraz kamery światła widzialnego. Wymienione elementy wchodzi w skład pojedynczego toru strzeleckiego. Możliwe jest równoległe połączenie wielu torów i ich integracja w jeden wspólny system szkoleniowy.

3.1. Kalibracja geometryczna

System projekcji obrazu składający się z wielu projektorów oraz ekranu projekcji musi mieć możliwość przeprowadzania kalibracji geometrycznej po to by zapewnić zachowanie linii prostych, na przestrzeni całej wizualizacji oraz prawidłowego odwzorowania kształtów wyświetlanych obiektów. Proces kalibracji geometrycznej został zautomatyzowany w celu skrócenia czasu kalibracji i uniezależnienia się od błędów wizualnej oceny jakości dokonywanej przez użytkownika. W tym celu po rozstawieniu projektorów na ekran rzucany jest wzorzec w postaci szachownicy, zawierający wybraną konfigurację punktów charakterystycznych. Wzorzec ten wykrywany jest następnie na strumieniu wideo kamery rejestrującej powierzchnię ekranu. Określony zostaje obszar świecenia projektora oraz referencyjne punkty odniesienia, związane z ekranem, w których wzorzec powinien zostać wyświetlony po kalibracji. Mając szczegółowe informacje o tym jak punkty charakterystyczne obrazu wyjściowego, wzorca, są obserwowane w obrazie z kamery wyliczone zostają parametry przekształcenia tekstury wyjściowej w ten sposób by po wyświetleniu jej na ekranie leżała w wybranym obszarze [2]. Metoda przekształcająca obraz wyjściowy opiera się na transformacji bi-liniowej:

$$X = a_0 + a_1U + a_2V + a_3UV \quad (1)$$

$$Y = b_0 + b_1U + b_2V + b_3UV \quad (2)$$

Po przekształceniach układu równań (1,2) otrzymujemy równania dla współrzędnych U i V:

$$U = (X - a_0 - a_2V)(a_1 + a_3V) \quad (3)$$

$$V = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (4)$$

gdzie X , Y to współrzędne obrazu wyjściowego projektora a U i V oryginalnego obrazu, który ma zostać przekształcony. Natomiast parametry A , B i C opisane są równaniami (5,6,7):

$$A = (b_2a_3 - b_3a_2) \quad (5)$$

$$C = (b_0a_1 - b_1a_0) + (b_1X - a_1Y) \quad (6)$$

$$B = (b_0a_3 - b_3a_0) + (b_2a_1 - b_1a_2) + (b_3X - a_3Y) \quad (7)$$

Kalibracja geometryczna polega na zapewnieniu bezszwowego połączenia sąsiadujących projekcji obrazu tak by zapewnić spójność wizualizacji na powierzchni całego ekranu.

3.2. Kalibracja fotometryczna

Pierwszym etapem kalibracji fotometrycznej jest detekcja obszarów świecenia każdego z projektorów w układzie odniesienia związanym z ekranem. Realizacja polega na wyświetleniu zielonego obrazu kolejno na projektorach oraz rejestracja przez kamerę obszarów ich projekcji (rys. 1). Wcześniej należy dokonać kalibracji kamery [14].

Kolejne kroki algorytm kalibracji fotometrycznej wielo-projektorowego systemu projekcji obrazu przedstawiono poniżej:

1. Wyznaczenie przekształcenia pomiędzy układami współrzędnych związanymi z projektorami [8]
2. Określenie balansu bieli dla każdego projektora indywidualnie [13], który jest potrzebny do określenia wzmocnienia dla każdego z kanałów, uniwersalnych dla wszystkich pikseli projektora
3. Przekształcenie gamy kolorów dla każdego piksela [13], czego wynikiem jest mapa redukcji jasności pikseli
4. Filtracja z wykorzystaniem morfologicznego otwarcia
5. Redukcja jasności każdego piksela [13, 8] na podstawie mapy wzmocnień oraz mapy przesunięcia czerni
6. Wygładzenie jasności dla każdego piksela [13], której wynikiem jest kolejna mapa wzmocnień

Wyniki kolejnych kroków kalibracji fotometrycznej prezentuje rysunek 2. Porównanie wyniku przed i po kalibracji fotometrycznej przedstawiono na rysunku. 3. Uzyskane wyniki umożliwiły utworzenie wizualizacji spójnej pod względem geometrycznym i barwnym dzięki czemu możliwe jest zwiększenie immersji w tworzonym systemie szkoleniowym.



Rys. 1. A-E Kolejne etapy automatycznej detekcji pola projekcji dla każdego z projektorów.

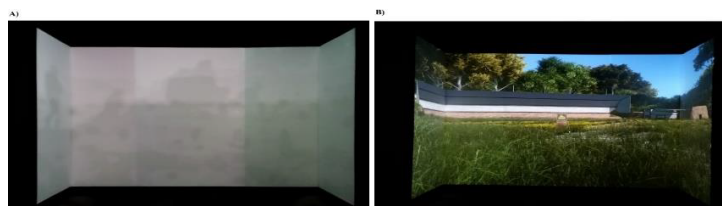


Rys. 2. Wyniki wybranych etapów algorytmu kalibracji fotometrycznej. A) Wynik po kroku 3, B) Wynik po kroku 4, C) Wynik po kroku 6.

3.3. Śledzenie plamki lasera IR

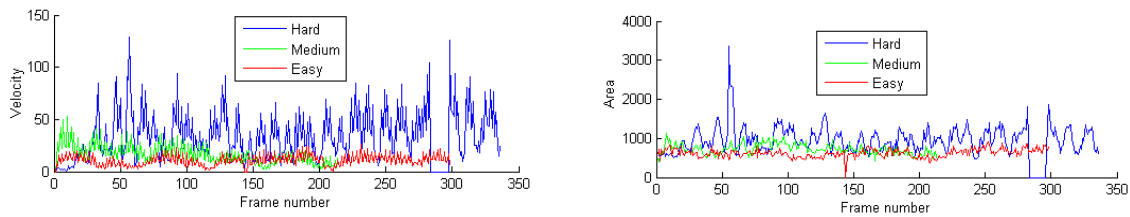
Nowoczesne algorytmy śledzenia są skupione na skomplikowanych obiektach, które można opisać w złożony sposób. W przeglądzie rozwiązań dotyczących śledzenia można wyróżnić cztery powtarzające się elementy: kolor, krawędzie, przepływ optyczny i tekstura. Cechy te są wykorzystywane do budowania modeli, tworzenia szablonów i funkcji gęstości prawdopodobieństwa i reprezentują dany obiekt. Najnowsze algorytmy śledzące są w stanie aktualizować dane na temat obiektu również podczas procesu śledzenia [17]. Jednakże śledzenie pojedynczej plamki lasera, której kształt nieznacznie wydłuża się podczas ruchu, nawet w warunkach laboratoryjnych wydaje się być trudnym zadaniem. Szczegóły na temat opracowanego algorytmu śledzenia zostały opisane w innym artykule [11].

Dane testowe śledzenia lasera składają się z trzech nagrań oznaczonych jako: Wolne, Normalne i Szybkie (rys. 4). Każde z nich to nagranie kamery śledzącej plamkę lasera, która porusza się po ekranie z określoną prędkością (rys. 5). W trybie wolnym laser porusza się wolno a plamka lasera nie zmienia swojego kształtu. W trybie normalnym zmiana kształtu plamki jest już zauważalna. Nagranie szybkie zawiera ujęcia plamki lasera rozciągniętej i rozmytej w większości klatek wideo. Prędkość oraz roz-

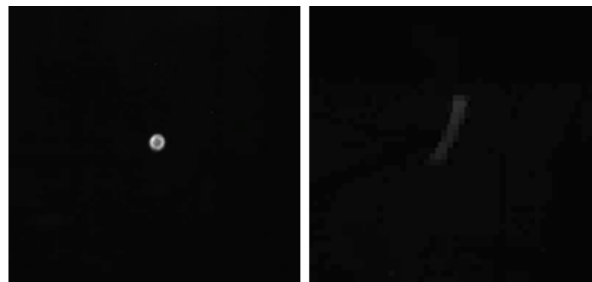


Rys. 3. Wynik działania algorytmu kalibracji fotometrycznej. A) Przed kalibracją, B) Po kalibracji.

miar plamki w czasie zostały przedstawione na wykresach (rys. 4).



Rys. 4. (Po lewej) Porównanie prędkości plamki lasera w nagraniu Wolnym, Normalnym i Szybkim. (Po prawej) Rozmiar plamki lasera dla nagrania Wolnego, Normalnego i Szybkiego.



Rys. 5. Porównanie plamki lasera z nagrania wolnego (po lewej) i nagrania szybkiego (po prawej).

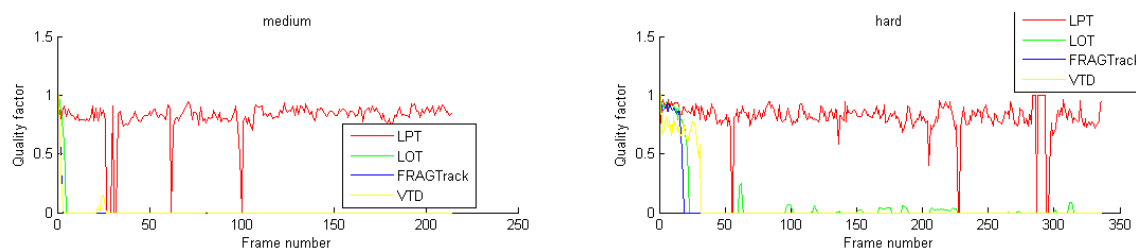
Porównano wyniki opracowanego algorytmu LPT (Laser Point Tracker) z wynikami uzyskanymi za pomocą innych metod: LOT, FraqTrack [18] i VTD [7] (rys. 6). Ustawiono domyślne wartości analizowanych algorytmów, zaproponowane przez ich autorów.

Współczynnik jakości q został obliczony za pomocą wzoru (8). Jest miarą podobieństwa obszaru wykrytej plamki w zakresie od 0 do 1. Jego wartość wynosi 0 gdy plamka nie została znaleziona w klatce wideo.

$$q = \begin{cases} 2 \frac{A \cap B}{A \cup B} & \text{gdy } A > 0; B > 0 \\ 0 & \text{gdy } A = 0; B > 0 \\ 1 & \text{gdy } A = 0; B = 0 \end{cases} \quad (8)$$

gdzie A jest obszarem plamki lasera w nagraniu referencyjnym, B rozmiarem plamki wykrytej przez algorytm.

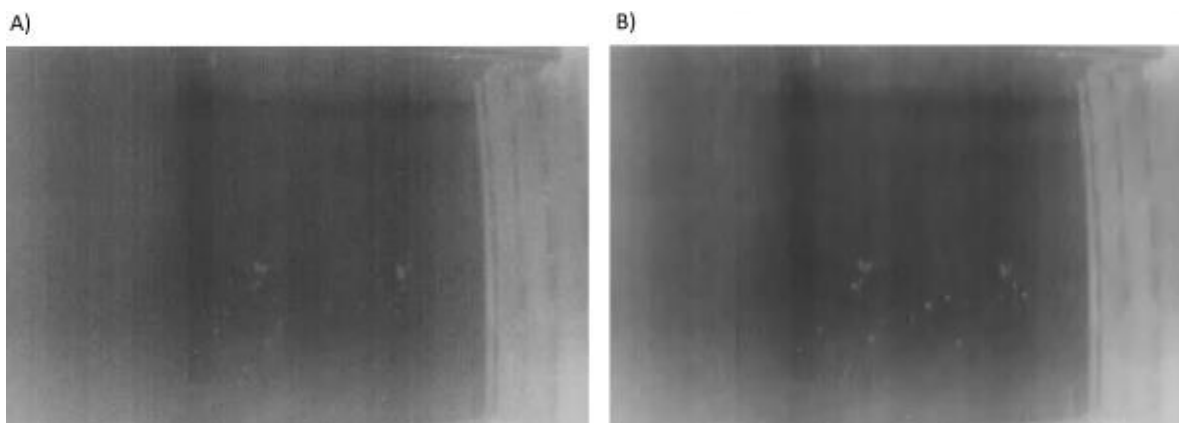
Proponowany algorytm LPT jest w stanie śledzić plamkę lasera, bez przerwy na przestrzeni całego nagrania. Nawet jeśli zgubi znacznik lasera, w którejś z klatek wideo to jest w stanie go odnaleźć w kolejnych. To jest to co wyróżnia algorytm na tle innych testowanych rozwiązań. Algorytmy LOT oraz VTD były w stanie skutecznie śledzić plamkę lasera jedynie w Wolnym nagraniu. W momencie, w którym plamka lasera się rozmywa lub zmienia kształt oba algorytmy zawodzą. Metoda FraqTrack nie była w stanie śledzić znacznika w żadnym z nagrań.



Rys. 6. Porównanie wartości współczynnika jakości q dla badanych algorytmów w nagraniu Normalnym (po lewej) oraz w nagraniu Szybkim (po prawej).

3.4. Detekcja miejsca trafienia

Opracowany i wdrożony, w oparciu o doświadczenia autorów z systemami rozpoznawania swój-obcy [16, 6], algorytm wykrywania trafień za pomocą analizy strumienia wideo z kamery termowizyjnej przeszedł rozległe testy pod względem ilościowym i jakościowym. Dane wejściowe dla algorytmu to strumień wideo z kamery termowizyjnej. Poniżej zaprezentowano pierwszą i ostatnią klatkę nagrania wideo z testu, w którym oddano 5 strzałów z broni palnej (rys. 7):



Rys. 7. Pierwsza (A) i ostatnia (B) klatka nagrania wideo rejestrującego pięć strzałów do ekranu.

Badania wykazały, że możliwe jest wykrycie strzałów oddawanych do tłumika rykoszetów z broni palnej na podstawie informacji wizyjnej w poniższych przypadkach:

1. Pojedynczy strzał
2. Seria strzałów (do 600 strzałów na minutę),
3. Strzał z pistoletu
4. Strzał z karabinu
5. Strzały w różne obszary ekranu
6. Strzały w to samo miejsce na ekranie

4. Podsumowanie

Uzyskane wyniki potwierdzają że opracowane algorytmy, w skład których wchodzi: kalibracja fotometryczna, detekcja miejsca trafienia pocisku z broni palnej na podstawie strumienia wideo z kamery termowizyjnej oraz śledzenia wskaźnika lasera w widmie bliskiej podczerwieni, umożliwiają stworzenie kompleksowego interaktywnego systemu strzelnicy multimedialnej. Potwierdzono eksperymentalnie, że opracowany algorytm kalibracji fotometrycznej daje możliwość zmniejszenia negatywnego wpływu różnicy w odcieniu, nasyceniu i luminancji charakteryzujących dany projektor. Co więcej za pomocą kalibracji można również zniwelować skutki eksploatacji projektorów polegające na zmianach w barwie wizualizacji zmieniającej się z czasem. Algorytm detekcji strzałów pozwala na wykrycie pojedynczych strzałów oraz serii, nawet do 600 strzałów na minutę. Uzyskane wyniki spełniają wymogi dotyczące prowadzonych szkoleń strzeleckich dla służb mundurowych.

Podsumowując, koncepcja multimedialnego systemu detekcji strzałów oraz opracowane algorytmy umożliwiają praktyczną implementację systemu i wykorzystanie w formie тренаżera strzeleckiego. Wykorzystanie technologii wirtualnych, pozytywnie wpływa na motywacje do ćwiczeń i wprowadza praktycznie nieograniczone możliwości pod względem projektowania i tworzenia scenariuszy treningowych. Dzięki umożliwieniu korzystania z broni palnej, stosowanej na co dzień w danych służbach mundurowych, użytkownicy mogą wypracować prawidłową pamięć mięśniową, dzięki czemu nabyte umiejętności mogą zostać użyte w rzeczywistych sytuacjach zawodowych [1, 15, 3]

5. Adnotacje

Praca została sfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu nr DOB-BIO6/11/90/2014 "Wirtualny symulator działań ochronnych Biura Ochrony Rządu".

LITERATURA

1. Bhagat, Kaushal Kumar, Wei-Kai Liou, and Chun-Yen Chang. "A cost-effective interactive 3D virtual reality system applied to military live firing training." *Virtual Reality* 20.2 (2016): 127-140.
2. Bhasker, Ezekiel, Ray Juang, and Aditi Majumder. "Registration techniques for using imperfect and partially calibrated devices in planar multi-projector displays." *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on* 13.6 (2007): 1368-1375.
3. Demski, P., Grzejszczak, T., Jędrasiak, K., Mikulski, M., *Automatic Targeting Sentry Turret for Distributed Systems, Vision Based Systems for UAV Applications*, ISBN: 978-3-319-00368-9, pp. 47-55, Springer-Verlag, 2013.
4. Internet source: <http://www.lasershot.com/government-military>
5. Internet source: <http://www.sst-germany.de/>
6. Jędrasiak K., Nawrat A., *The Comparison of Capabilities of Low Light Camera*,

- Thermal Imaging Camera and Depth Map Camera for Night Time Surveillance Applications, *Advanced Technologies for Intelligent Systems of National Border Security*, Ed. by A. Nawrat, K. Simek, A. Świerniak. Berlin : Springer, *Studies in Computational Intelligence*; vol. 440 1860-949X, ISBN 978-364-231-664-7, pp. 117-128, 2012.
7. Kwon, Junseok, and Kyoung Mu Lee. "Visual tracking decomposition." *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2010 IEEE Conference on. IEEE, 2010.
 8. Majumder, Aditi, and Rick Stevens. "Perceptual photometric seamlessness in projection-based tiled displays." *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 24.1 (2005): 118-139.
 9. Majumder, Aditi, Duy-Quoc Lai, and Mahdi Abbaspour Tehrani. "A multi-projector display system of arbitrary shape, size and resolution." *ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies*. ACM, 2015.
 10. Oron, Shaul, et al. "Locally orderless tracking." *International Journal of Computer Vision* 111.2 (2015): 213-228.
 11. Ryt, Artur, et al. "Real-time laser point tracking." *Computer Vision and Graphics*. Springer International Publishing, 2014. 542-551.
 12. Sajadi, Behzad, and Aditi Majumder. "Markerless view-independent registration of multiple distorted projectors on extruded surfaces using an uncalibrated camera." *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on* 15.6 (2009): 1307-1316.
 13. Sajadi, Behzad, et al. "Color seamlessness in multi-projector displays using constrained gamut morphing." *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 15.6 (2009).
 14. Sobel D., Jedrasiak K., Daniec K., Wrona J., Jurgaś P, Nawrat AM, *Camera Calibration for Tracked Vehicles Augmented Reality Applications, Innovative Control Systems for Tracked Vehicle Platforms*, vol. 2, pp. 147-162, ISBN (Print) 978-3-319-04623-5, ISBN (Online) 978-3-319-04624-2, 2014.
 15. Sobel D., Kwiatkowski J., Ryt A., Domzal M., Jedrasiak K., Janik L., Nawrat A., *The System for Augmented Reality Motion Measurements Visualization*, vol. 33, *Studies in Systems, Decision and Control*, pp. 189-200, Springer International Publishing, ISBN: 978-3-319-21117-6, 2015.
 16. Wilk P., Targiel T., Sobel D., Kwiatkowski J., Jedrasiak K., Nawrat A., *The Concept of an Active Thermal Camouflage for Friend-Foe Identification System, Innovative Simulation Systems*, vol. 33, *Studies in Systems, Decision and Control*, pp. 67-76, Springer International Publishing, ISBN: 978-3-319-21117-6, 2015.
 17. Wu, Yi, Jongwoo Lim, and Ming-Hsuan Yang. "Online object tracking: A benchmark." *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2013.
 18. Yang, Fan, Huchuan Lu, and Yen-Wei Chen. "Bag of features tracking." *Pattern Recognition (ICPR)*, 2010 20th International Conference on. IEEE, 2010.